

УДК 669.71

Р. Ю. Барков^{*}, А. Г. Мочуговский, О. А. Яковцева, А. В. Поздняков

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
г. Москва

**barkov@misis.ru*

МИКРОСТРУКТУРА И СВОЙСТВА СПЛАВА Al–Y–Er–Zr–Sc С ПРИМЕСЯМИ Fe И Si

Исследовано влияние примесей кремния и железа на структуру, фазовый состав и механические свойства сплава Al–0,2Y–0,3Er–0,2Zr–0,05Sc. В сплаве Al–Y–Er–Zr–0,05Sc (0,15 % (Fe и Si)) отмечено наличие фаз, образованных примесями железа и кремния, наблюдается повышенная концентрация циркония, эрбия и иттрия в этих фазах, тогда как для сплава Al–Y–Er–Zr–0,05Sc (0,01 % (Fe и Si)) образование подобных фаз отмечено не было.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы; редкоземельные металлы рекристаллизация; механические свойства; микроструктура

R. Yu. Barkov, A. G. Mochugovskiy, O. A. Yakovtseva, A. V. Pozdniakov

MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF Al–Y–Er–Zr–Sc ALLOY WITH Fe AND Si IMPURITIES

The influence of silicon and iron impurities on the structure, phase composition and mechanical properties of the alloy Al–0,2Y–0,3Er–0,2Zr–0,05Sc was investigated. In the alloy Al–Y–Er–Zr–0,05Sc (0,15 % (Fe and Si)), the presence of phases formed by impurities of iron and silicon was noted, there was an increased concentration of zirconium, erbium and yttrium in these phases, whereas for the alloy Al–Y–Er–Zr–0,05Sc (0,01 % (Fe and Si)), the formation of such phases was not observed.

Keywords: aluminum alloys; rare earth metals; recrystallization; mechanical properties; microstructure

В последние годы большое количество исследований посвящено анализу влияния добавок иттрия и эрбия на структуру и свойства чистого алюминия Al [1] и сплавов на основе системы Al–Mg [2].

Малые добавки эрбия и иттрия повышают свойства алюминия и его сплавов за счет образования дисперсоидов типа Al_3M в процессе отжига [1]. В присутствии циркония и скандия эффект упрочнения при отжиге повышается за счет образования дисперсоидов $Al_3(Zr, Y)$ [3], $Al_3(ErZr)$ [1] и $Al_3(Sc, Zr, Er)$ [4]. В сплаве $Al-0,04 \text{ ат. \% Er}$ твердость в процессе отжига достигает 400 МПа за счет выделения дисперсной фазы Al_3Er в процессе отжига [1]. А при введение в этот сплав 0,08 ат. \% Zr твердость возрастает до 560 МПа [1]. В сплаве $Al-Zr-Sc-Si$ замена 0,01 ат. \% скандия на эрбий привела к повышению характеристик ползучести после двухступенчатого отжига по режиму 300 °С, 4 ч и 425 °С, 8 ч [5]. Добавка иттрия в сплавы системы $Al-Zr$ приводит к ускорению кинетики выделения дисперсоидов фазы Al_3Zr и образованию частиц фазы $Al_3(Zr, Y)$ меньшего размера [3].

Изображения в характеристических излучениях элементов на картах распределения на рисунке 1 показывают, что светлые фазы обогащены Y и Er и Y, Er и Zr (рис. 1, а), а в случае сплава $Al-Y-Er-Zr-0,05Sc$ (85) отмечено наличие фаз образованных примесями железа и кремния (рис. 1, б). Также для сплава $Al-Y-Er-Zr-0,05Sc$ (85) в фазах, содержащих примеси железа и кремния, отмечается повышенная концентрация циркония, эрбия и иттрия, но при этом иттрий не образует фаз с железом (рис. 2, б). В литом сплаве $Al-Y-Er-Zr-0,05Sc$ (85) образуются многокомпонентные кристаллизационные фазы ($AlSiFeEr(Zr)$) и ($AlSiErY(Zr)$). Скандий не входит ни в одну фазу кристаллизационного происхождения в обоих сплавах.

Сплав $Al-Y-Er-Zr-0,05Sc$ (85), выплавленный на алюминии Al (99,85 %), показывает меньший эффект упрочнения в процессе отжига при 440 °С, при этом твердость возрастает на 7–9 HV. Отметим, что абсолютное значение твердости не превышает 35 HV, в то время как на сплаве $Al-Y-Er-Zr-0,05Sc$ (99) достигается твердость до 40 HV. Меньший эффект упрочнения для сплава $Al-Y-Er-Zr-0,05Sc$ (85) связан с более низкой концентрацией циркония, эрбия и иттрия в алюминиевом твердом растворе.

На рисунке 2 представлены результаты структурных исследований отожженных при 500 и 550 °С в течение 1 часа листов сплавов $Al-Y-Er-Zr-0,05Sc$ (85) и $Al-Y-Er-Zr-0,05Sc$ (99). Для сплава $Al-Y-Er-Zr-0,05Sc$ (99) температура начала рекристаллизации находится в интервале 500–550 °С, поскольку после часового отжига при 550 °С структура полностью рекристаллизована, тогда как при часовой

выдержке при 500 °С выявлены деформированные зерна. Для сплава Al–Y–Er–Zr–0,05Sc (85) температура начала рекристаллизации несколько выше и находится в интервале 550–600 °С, так как при часовой выдержке 550 °С наблюдается частично рекристаллизованная структура. В таблице представлены результаты определения условного предела текучести ($\sigma_{0,2}$), предела прочности (σ_B) и относительного удлинения (δ) исследованных сплавов.

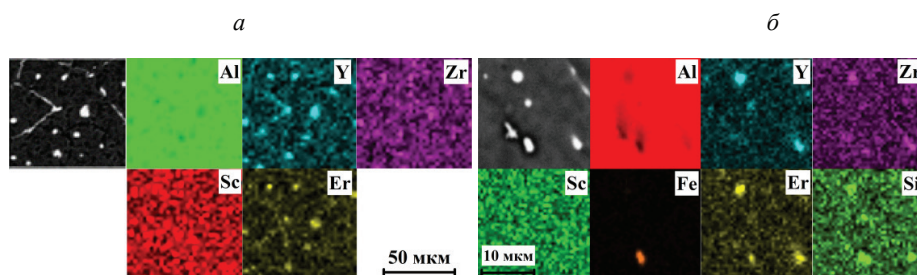


Рис. 1. Карты распределения легирующих элементов между фазами в исследованных сплавах в литом состоянии:

a — Al–Y–Er–Zr–0,05Sc (99), *б* — Al–Y–Er–Zr–0,05Sc (85)

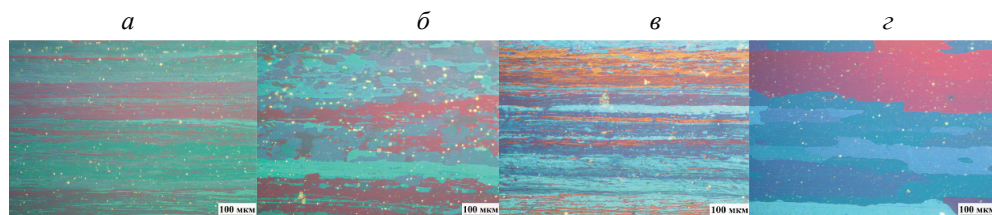


Рис. 2. Микроструктуры (световая микроскопия) исследованных сплавов в отожженном при 500 (*a*, *в*) и 550 °С (*б*, *г*):

a, *б* — Al–Y–Er–Zr–0,05Sc (85), *в*, *г* — Al–Y–Er–Zr–0,05Sc (99)

Таблица

Результаты испытаний на растяжение исследуемых сплавов

Режимы	Al–Y–Er–Zr–0,05Sc (85)			Al–Y–Er–Zr–0,05Sc (99)		
	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %
Деформ.	155	166	11,2	155	166	8,7
200 °С, 1 час	157	169	10,2	158	168	5,8

Окончание табл.

Режимы	Al–Y–Er–Zr–0,05Sc (85)			Al–Y–Er–Zr–0,05Sc (99)		
	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %
100 °C, 3 часа	155	166	10,0	157	166	12,8
150 °C, 3 часа	156	170	9,0	154	165	11
200 °C, 4 часа	152	165	12,4	151	163	12,2
300 °C, 1 часа	152	165	13,1	154	165	7,7

Литература

1. Synergetic effect of Er and Zr on the precipitation hardening of Al–Er–Zr alloy / S. P. Wen [et al.], Scr. Mater. 65 (2011). P. 592–595.
2. Effects of homogenization on microstructures and properties of a new type Al–Mg–Mn–Zr–Ti–Er alloy / L. Z. He [et al.] // Mater. Sci. and Eng. A. 527 (2010). P. 7510–7518.
3. Structural and compositional evolution of Al_3 (Zr, Y) precipitates in Al–Zr–Y alloy / H. Gao [et al.] // Mater. Charact. 121 (2016). P. 195–198.
4. Improving aging and creep resistance in a dilute Al–Sc alloy by microalloying with Si, Zr and Er / N. Q. Vo [et al.] // Acta Mater. 63 (2014). P. 73–85.
5. Effect of Er additions on ambient and high-temperature strength of precipitation-strengthened Al–Zr–Sc–Si alloys / C. Booth-Morrison [et al.] // Acta Mater. 60 (2012). P. 3643–3654.